



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS**

№3, ТОМ 15 (2009) 201-208

УДК 624.014.04:666.1.013

(09)-0197-1

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НДС МЕТАЛЕВОГО КАРКАСУ ВАННОЇ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ ПІД ЧАС ВПЛИВУ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР

А.М. Югов^а, В.І. Москаленко^б, Г.В. Іхно^а, А.Н. Миронов^а

^аКафедра "Металеві конструкції", Донбаська національна академія будівництва і архітектури, вул. Державіна 2, м. Макіївка, 86123, Україна.

E-mail: amyrus@mail.ru;

^бТОВ "Промбудремонт", вул. Лазаренко, 63, м. Донецьк, 83017, Україна.

E-mail: amyrus@mail.ru.

Отримана 16 вересня 2009; прийнята 28 вересня 2009

Анотація. У статті обґрунтована необхідність відстеження НДС металевого каркаса обв'язки скловарної печі, дано опис конструктивного рішення печі, приведена її розрахункова схема. Наведені принципи статичного розрахунку плоскої рами каркаса обв'язки, описані методика визначення додаткових навантажень від температурних навантажень. Побудовано просторову розрахункову схему скловарної печі. Зроблено розрахунок і оцінку напруг в каркасі за допомогою МКЕ. Викладено висновки, в яких обґрунтований факт значного впливу температурних навантажень на металевий каркас печі, а також необхідність подальшого визначення дійсної роботи металевого каркасу обв'язки скловарної печі шляхом експериментальних досліджень.

Ключові слова: скловарна піч, температура, футеровка, металеві конструкції.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НДС МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КАРКАСА ВАННОЙ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

А.М. Югов^а, В.И. Москаленко^б, А.В. Ихно^а, А.Н. Миронов^а

*^аДонбасская национальная академия строительства и архитектуры,
ул. Державина 2, г. Макеевка, 86123, Украина.*

E-mail: amyrus@mail.ru;

^бООО "Промбудремонт", ул. Лазаренко, 63, г. Донецк, 83017, Украина.

E-mail: amyrus@mail.ru.

Получена 16 сентября 2009; принята 28 сентября 2009

Аннотация. В статье обоснована необходимость отслеживания НДС металлического каркаса обвязки стекловаренной печи, дано описание конструктивного решения печи, приведена ее расчетная схема. Приведены принципы статического расчета плоской рамы каркаса обвязки, описаны методики сбора нагрузок на раму металлического каркаса обвязки стекловаренной печи, приведена методика определения дополнительных нагрузок от температурных воздействий. Построена пространственная расчетная схема стекловаренной печи. Произведен расчет и оценка напряжения в каркасе с помощью МКЭ. Изложены выводы, в которых обоснован факт значительного влияния температурных нагрузок на металлический каркас печи, а также необходимость дальнейшего определения действительной работы металлического каркаса обвязки стекловаренной печи путем экспериментальных исследований.

Ключевые слова: стекловаренная печь, температура, футеровка, металлические конструкции.

STUDY OF THE VAT PARAMETERS OF A GLASS-MELTING TANK FURNACE METALLIC FRAMEWORK UNDER ELAVATED TEMPERATURE

A.M. Yugov^a, V.I. Moskalenko^b, A.V. Ihno^a, A.M. Mironov^a

^aDonbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
Derzavin str. 2, Makeyevka, 86123, Ukraine.
E-mail: amyrus@mail.ru;

^b"Prombudremont" Ltd, 63, Lazarenko St., Donetsk, 83017, Ukraine.
E-mail: amyrus@mail.ru.

Received 16 September 2009; accepted 28 September 2009

Abstract. There is grounded a necessity of monitoring the VAT of a glass-melting tank furnace metallic framework, the furnace structural concept is described, and its design model is given. There are given static design principles of a plane frame, methods of collecting loads on the metallic framework of the glass-melting tank furnace framework and methods of determining additional loads as a function of temperature are described. A space design model of the glass-melting furnace has been made. A design and estimation of strain in the framework were made with the help of the finite-element method (FEM). There were drawn conclusions to substantiate the fact of a considerable influence of temperature loads on the furnace metallic framework and a necessity of a further testing of a useful output of the glass-melting tank furnace framework by means of pilot studies.

Keywords: glass-melting furnace, temperature, furnace lining, metallic structures.

Введение

Практически всегда перед проектировщиками встает проблема выбора расчетной схемы конструкции. Достаточно точную оценку напряжений в каркасе можно получить с помощью МКЭ, применяя его для каждого отдельного элемента конструкции. На целесообразность применения МКЭ для исследования напряжений в конструкциях указывает ряд ученых. Данный метод применим на стадии предварительного расчета или при первоначальных теоретических исследованиях новых типов конструкций, но требует экспериментального подтверждения.

Основная часть

Описание конструктивного решения. Каркас печи представляет собой пространственную систему, состоящую из комплекса металлических элементов (колонн, балок и прокатных листов), соединенных между собой сваркой, болтами и тяжами из круглой стали.

Как правило, на бетонные (кирпичные) опоры уложены двутавровые балки как в продольном, так и в поперечном направлениях (рис.1).

На них уложен металлический лист $t=6$ мм. Футеровочная кладка стягивается вертикальными колоннами (в данном случае это 6 боковых и 4 торцевых колонны) прокатного профиля, связанными тяжами (связями) поверху из круглой стали. Распор свода печи воспринимается этими колоннами через опорный уголок (рис.2).

Определение расчетной схемы печи

Моделирование и расчет каркаса печи производился с использованием программы SCAD Office, реализованной в среде Windows при упругой работе материала.

Для получения наиболее точных усилий в элементах была построена пространственная схема каркаса печи. Построение расчетной схемы осуществлялось с помощью алгоритмов комплекса SCAD Office. Среди особенностей расчетной схемы, помимо прочих, можно выделить следующие:

- все задачи решались без учета нелинейности;
- при расчете не учитывалась анизотропность кирпичной кладки, расчет жесткости кирпичной кладки произведен на основании СНиП [3];

- не учитывалась релаксация кирпичной кладки, то есть перераспределение напряжений в ней в результате ползучести и других физико-механических процессов.

К прочим можно отнести все упрощения и пренебрежения, присущие МКЭ и алгоритмам программы SCAD, являющимися одинаковыми для любой подобной задачи.

В расчетной схеме применены следующие типовые элементы: стержни (5 – пространственный стержень с шестью степенями свободы), оболочки (42,44 – с шестью степенями свободы) – согласно наименованиям, принятым в ПК SCAD.

Принципы статического расчета плоской рамы каркаса обвязки печи без учета дополнительных усилий от температурных нагрузок были опубликованы в Вестнике ДонНАБА выпуск 2008-3(71) "Технология, организация, механизация та геодезичне забезпечення будівництва" стр.149-154.

Фактически, расчетной схемой каркаса печи является пространственная рама с жестким креплением колонн с днищем и стянуты тяжами шарнирно сверху. Для такой рамы характерно появления трех силовых факторов: изгибающих моментов M , поперечных сил Q и продольных осевых усилий N в стержнях.

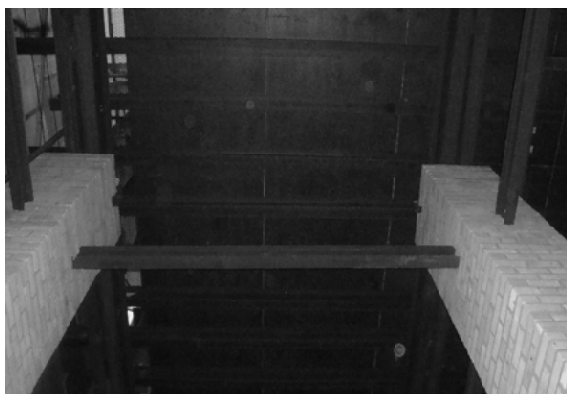


Рис. 1. Конструкция днища печи.



Рис. 2. Крепление опорного уголка к колонне.

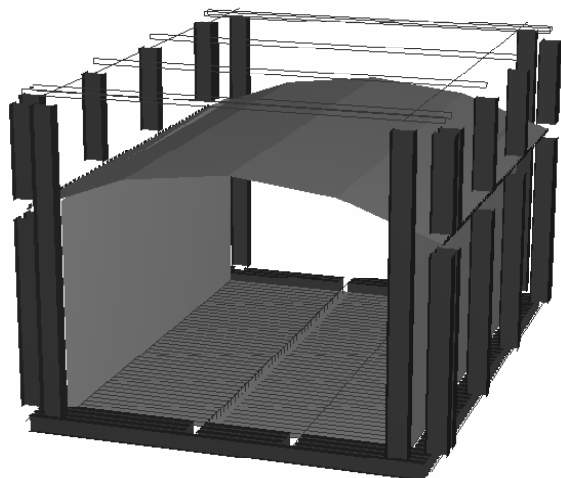


Рис. 3. Пространственная схема конструкции стекловаренной печи.

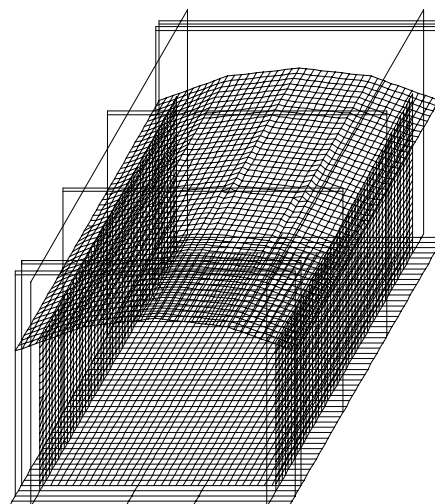


Рис. 4. Расчетная модель печи.

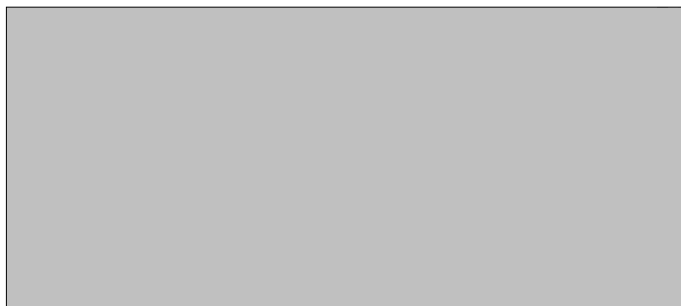


Рис. 5. Днище печи.

Исходя из этого, определение расчетных усилий для модели каркаса производилось в два этапа. На первом этапе производился статический расчет рамы со стандартными нагрузками, от собственного веса и веса стекломассы. Целью данного расчета является выявление внутренних силовых факторов. Расчеты показали, что поперечная сила Q в элементах узлов — незначительна, а основными являются изгибающий момент M и продольная сила N .

На втором этапе определялись дополнительные и очень важные нагрузки от температуры, которые прикладывались к стенкам, днищу, к своду.

Конструктивные решения печи

Конструкция дна в расчетной схеме представлена системой металлических балок различных сечений, поэтажно уложенных друг на друга, опертых на бетонные (кирпичные столбики) и укрытые металлическим листом $\delta=6$ мм, поверх которого уложена огнеупорная кладка из дианаса. Совместную работу металлического листа и футеровочного кирпича учтем как приведенное сечение (стальной лист — огнеупорная кладка). Принимаем толщину днища в расчетной схеме 28,7 мм.

Толщина стенок печи меняется по высоте, т.е. кладка на уровне от дна до 1,9 м имеет толщину 600 мм, выше до свода (1,775 м) — 400 мм. Толщина кирпича свода равна 600 мм.

Сбор нагрузки на конструкцию стекловаренной печи

Нагрузкой на дно и каркас в целом печи является давление огнеупоров и стекломассы.

Поэтому сформированы такие загрузки: постоянное — собственный вес металлоконструкций и огнеупоров, а также переменное длительно действующее — давление стекломассы и температурную нагрузку.

Постоянная нагрузка (собственный вес)

Расчетная площадь приложения нагрузки, касающаяся металлической части дна

$$S = 7.68 \cdot 10.32 = 79,25 \text{ м}^2;$$

- вес листа $d=6$ мм и площадью 1 кв.м. равен 50 кг:

$$g_{\text{ст.л.}} = \frac{50 \text{ кг}}{79,25 \text{ м}^2} = 0,63 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} (0,00618 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2})$$

$$g_{\text{ст.л.}}^p = g_{\text{ст.л.}} \cdot 1,2 = 0,63 \cdot 1,2 = 0,756 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} (0,0074 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2})$$

- продольные балки прокатного сечения I40Б1 масса 1 м $m=48,1$ кг.

Всего длина продольных балок $l=61,92$ п.м.:

$$g_{\text{пр.ст.б.}} = 48,1 \cdot 61,92 = 2978,4 \text{ кг} (29,2181 \text{ кН})$$

$$g_{\text{пр.ст.б.}}^p = g_{\text{пр.ст.б.}} \cdot 1,2 = 2978,4 \cdot 1,2 = 3574,1 \text{ кг} (35,06192 \text{ кН})$$

- поперечные балки уложены через 0,2 м прокатного сечения I30Б1 масса 1 м $m=32,9$ кг.

Всего длина продольных балок $l=399,36$ п.м.:

$$g_{\text{нон.ст.б.}} = 32,9 \cdot 399,36 = 13138,9 \text{ кг} (128,8 \text{ кН})$$

$$g_{\text{нон.ст.б.}}^p = g_{\text{нон.ст.б.}} \cdot 1,2 = 13138,9 \cdot 1,2 = 15766,7 \text{ кг} (154,6 \text{ кН})$$

- собственный вес вертикальных стоек. Примем эти стойки прокатного профиля I40Ш1 масса 1 м $m=124$ кг. Длина одной стойки $l=6,14$ м:

$$g_k = 124 \cdot 6,14 = 761,4 \text{ кН} (7,46 \text{ кН})$$

$$g_{\text{общ.к.}} = 16 \cdot 761,4 = 12181,76 \text{ кН} (119,5 \text{ кН})$$

$$g_{\text{общ.к.}}^p = g_{\text{общ.к.}} \cdot 1,2 = 12181,76 \cdot 1,2 = 14618,11 \text{ кН} (143,4 \text{ кН})$$

Расчетная площадь приложения нагрузки, касающаяся части каркаса печи,

$$S = 8,8 \cdot 6,48 = 57,02 \text{ м}^2$$

- собственный вес кладки дна толщиной 600 мм, дно выложено динасом

$$(\rho = 2,38 \frac{\text{т}}{\text{см}^3} = 23,3 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}):$$

$$g_{\text{кл.дн.}} = 23,3 \cdot 0,6 = 13,98 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$$

$$g_{\text{кл.дн.}}^p = g_{\text{кл.дн.}} \cdot 1,2 = 13,98 \cdot 1,2 = 16,8 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$$

- постоянная нагрузка от кладки стен:

$$g_{\text{в.ст.}} = 23,3 \cdot 0,6 = 13,98 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$$

$$g_{\text{в.ст.}}^p = g_{\text{в.ст.}} \cdot 1,2 = 13,98 \cdot 1,2 = 16,8 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$$

$$g_{\text{низ.ст.}} = 23,3 \cdot 0,4 = 9,32 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$$

$$g_{\text{низ.ст.}}^p = g_{\text{низ.ст.}} \cdot 1,2 = 9,32 \cdot 1,2 = 11,2 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$$

- площадь поперечного сечения, масса свода:

$$S_{\text{нон.с.}} = l_{\text{св.нон.с.}} \cdot t = 8,1 \cdot 0,6 = 4,86 \text{ м}^2$$

$$V_{\text{свода}} = S_{\text{нон.с.}} \cdot l_{\text{дл.св.}} = 4,86 \cdot 8,85 = 43 \text{ м}^3$$

$$m_{\text{свода}} = 43 \cdot 23,3 = 1002 \text{ кН}$$

Отображение приложения нагрузки от собственного веса рис. 6.

Длительно действующая нагрузка (вес стекломассы)

Вес 1м² стекла, толщиной в 1мм — $\rho = 2,5 \frac{\text{т}}{\text{м}^3}$

Следовательно, вес стекломассы см. рис. 7.

$$g_{\text{стекл.}} = 2,5 \cdot 1,26 = 3,15 \frac{\text{т}}{\text{м}^2} (30,9 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2})$$

$$g_{\text{стекл.}}^p = g_{\text{стекл.}} \cdot 1,2 = 3,15 \cdot 1,2 = 3,78 \frac{\text{т}}{\text{м}^2} (37,08 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2})$$

Длительно действующая нагрузка (действие высоких температур)

Специфика приложения этой нагрузки, как уже было сказано выше в обзоре действия температур в стекловаренной печи, заключается в ее неравномерном действии по длине печи, но мы в расчетной схеме будем принимать температуру наиболее высокую в варочной части печи 1590°C, в зоне загрузочного кармана 1450°C и 1350°C - в выработочной части. Также, говоря о специфике расчета по температуре, нужно учесть тот факт, что в

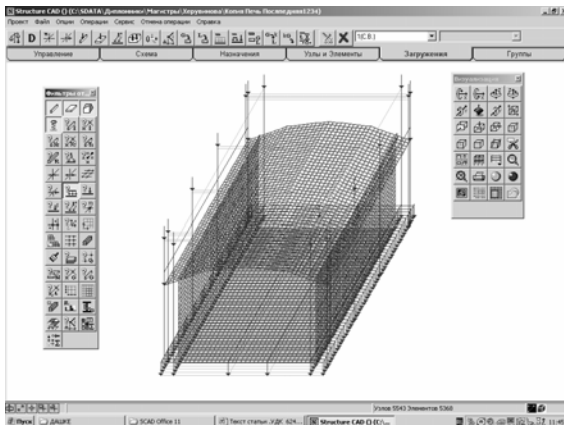


Рис. 6. Распределение собственного веса в расчетной модели печи.

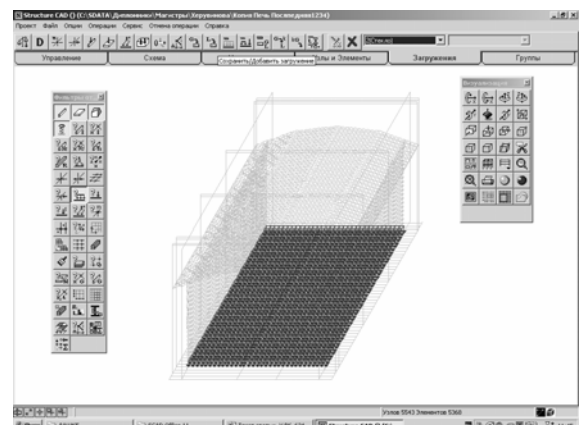


Рис. 7. Распределение веса стекломассы по дну печи.

стекловаренной печи непосредственный контакт металлического каркаса и футеровки существует только лишь в зоне опирания свода через уголок к колонне. Исходя из этого, в расчетной схеме приложенная температурная нагрузка будет оказывать влияние на усилия в каркасе только через эту зону. Температурную нагрузку можно приложить двумя способами:

- как градиент температур на всю толщину свода;
- как усилие от расширения кладки при средней температуре, действующей на свод.

1. Зная максимальную температуру внутри печи, толщину и площадь свода, коэффициент теплопроводности динаса, определяем термическое сопротивление кладки:

$$R = \frac{S}{\lambda}$$

где S — площадь свода;

λ — коэффициент теплопроводности.

$R = \frac{4,86}{1,65} = 2,9$. По графику определяем потееу тепла через кладку свода и температуру наружной поверхности свода. $t_{нар} = 70^\circ\text{C}$.

Коэффициент линейного расширения динаса $\alpha = 1,15 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$.

Получаем разность температур свода:

- $\Delta t = 1590 - 70 = 1520^\circ\text{C}$ — в зоне варки;
- $\Delta t = 1450 - 70 = 1380^\circ\text{C}$ — в зоне загрузочного кармана;
- $\Delta t = 1350 - 70 = 1280^\circ\text{C}$ — в выработочной зоне.

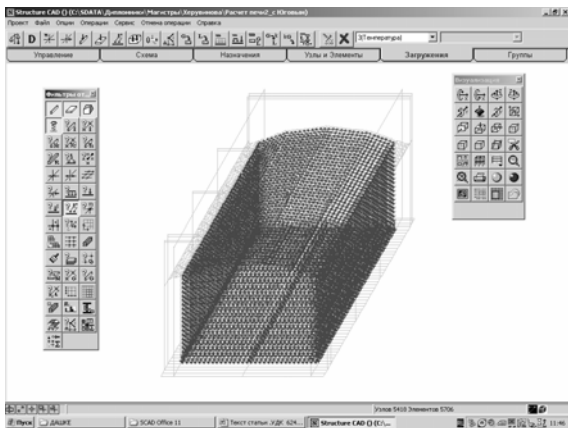


Рис. 8. Приложение температурной нагрузки.

Температуру днища принимаем 80°C — в зоне варки и 50°C — в зоне загрузки и выработки. Данные цифры получены практическим путем при помощи измерений.

2. Дополнительные усилия от распора свода при действии температуры, равной среднему значению внутренней и наружной температур.

$$t = \frac{1590 + 70}{2} = 830^\circ\text{C}.$$

Удлинение от термического расширения находим по формуле:

$$\Delta l = \alpha_{cp} \cdot t \cdot l_{свода}$$

где α_{cp} — средний коэффициент термического расширения материала при нагреве в интервале температур от 0 до t , $^\circ\text{C}$, $1/^\circ\text{C}$;

t — принятая температура нагрева, $^\circ\text{C}$.

$$\Delta l = 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 830 \cdot 8,1 = 77,3 \text{ мм}$$

На каждую сторону свода будет приходиться:

$$\Delta l_1 = \frac{\Delta l}{2} = \frac{77,3}{2} = 38,65 \text{ мм}$$

Второй способ не очень корректен и трудоемок, поэтому в расчетной схеме будем учитывать температуру распределенной.

Собранные нагрузки заносим в проектно-вычислительный комплекс SCAD. Комплекс реализует конечно-элементное моделирование статических и динамических расчетных схем,

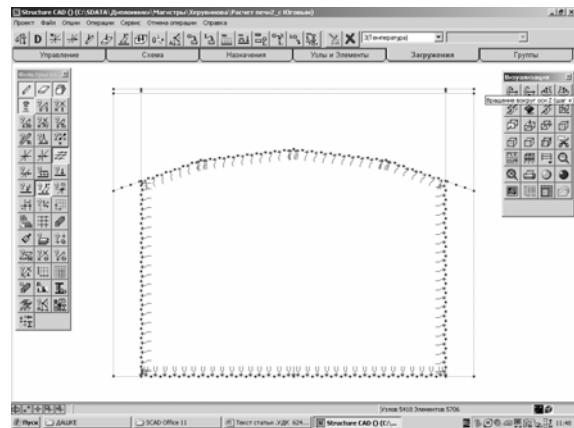


Рис. 9. Направление действия температуры.

проверку устойчивости, выбор невыгодных сочетаний усилий, проверку несущей способности стальных конструкций.

Определение усилий в элементах конструкций

Расчет конструкций выполнен с помощью программного комплекса "SCAD".

В программном комплексе предусмотрено автоматизированное формирование расчетных сочетаний усилий (PCY), соответствующее нормативным документам, действующим в проектировании объектов строительства.

Для стержневых элементов задача выбора PCY сводится к нахождению экстремальных значений нормальных и касательных напряжений, вычисленных в характерных точках сечения. Поэтому и критериями здесь являются экстремальные напряжения в этих точках сечения.

Выводы

Полученные в результате расчета сечения колонн, балок и тяжей не сильно отличаются от принятых в строительстве. На этот факт значительное влияние оказала температурная нагрузка, которая в 4-5 раз увеличивала усилия и напряжения в металлическом каркасе, поскольку от постоянных нагрузок они небольшие.

Литература:

1. Бельский В.И., Сергеев Б.В. Промышленные печи и трубы.—М.: Стройиздат, 1974.—301с.
2. Волгина Ю.М. Теплотехническое оборудование стекловаренных заводов.—М.: Стройиздат, 1974.—307с.
3. СНиП П-23-81* Стальные конструкции/Госстрой СССР.—М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1991.—96с.
4. Тринкс В.Н. Промышленные печи.—М.: Стройиздат, 1961.—392с.
5. Шишков И.А. Сооружение промышленных печей.—М.: Стройиздат, 1978.—416с.

Югов Анатолий Михайлович — д.т.н., профессор, завідувач кафедри "Технологія, організація та охорона праці в будівництві" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: Проектування, монтаж, експлуатація, технічна діагностика, оцінка технічного стану, реконструкція та підсилення будівельних металевих конструкцій, технологія та організація робіт при будівництві та реконструкції будівель та споруд.

Москаленко Володимир Іванович — к.т.н., академік Академії будівництва України, генеральний директор ТОВ "Промбудремонт". Наукові інтереси: технології приготування бетонних сумішей експериментально-статичного моделювання.

Іхно Ганна Володимирівна — асистент кафедри "Технологія, організація та охорона праці в будівництві". Наукові інтереси: проектування, монтаж, експлуатація, технічна діагностика, оцінка технічного стану, реконструкція та підсилення будівельних металевих конструкцій, технологія та організація робіт при будівництві та реконструкції будівель та споруд.

Миронов Андрій Миколайович — к.т.н., доцент кафедри "Металеві конструкції" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: дослідження роботи сталезалізобетонних конструкцій.

Югов Анатолий Михайлович — д.т.н., профессор, заведующий кафедрой "Технология, организация и охрана труда в строительстве" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: проектирование, монтаж, эксплуатация, техническая диагностика, оценка технического состояния, реконструкция и усиление строительных металлических конструкций, технология и организация работ при строительстве и реконструкции зданий и сооружений.

Москаленко Владимир Иванович — к.т.н., академик Академии строительства Украины, генеральный директор ООО "Промбудремонт". Научные интересы: технологи приготовления бетонных смесей экспериментально-статического моделирования.

Ихню Анна Владимировна — ассистент, кафедры "Технология, организация и охрана труда в строительстве" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: проектирование, монтаж, эксплуатация, техническая диагностика, оценка технического состояния, реконструкция и усиление строительных металлических конструкций, технология и организация работ при строительстве и реконструкции зданий и сооружений.

Миронов Андрей Николаевич — к.т.н., доцент кафедры "Металлические конструкции" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: Исследование работы сталежелезобетонных конструкций.

Yugov Anatoly Mikhailovich — Dr. Sc. (Eng.), professor, Head of the Department "Technology, Organization and Labour Protection in Construction" of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: design, assembly, operation, technical diagnostics, technical evaluation, reconstruction and reinforcing of building metallic structures, technology and organizational management of the construction and reconstruction of buildings.

Moskalenko Vladimir Ivanovich — Ph.D. (Eng.), an academician of the Civil Engineering Academy of Ukraine, general director of the company "Prombudremont" Ltd. Scientific interests: technology of concrete mix preparation of the experimental and static modeling.

Ihno Anna Vladimirovna — an assistant professor of the Department "Technology, Organization and Labour Protection in Construction" of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: design, assembly, operation, technical diagnostics, technical evaluation, reconstruction and reinforcing of building metallic structures, technology and organizational management of the construction and reconstruction of buildings.

Mironov Andrey Nikolayevich — Ph.D. (Eng.), an associate professor of the Department "Metallic Structures" of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: Investigation of the steel-iron-concrete structures operation.